

# 不同橡胶林林冠下的土壤溅蚀率及 穿透水侵蚀力比较

罗亲普<sup>1,2</sup>, 刘文杰<sup>1</sup>

(1.中国科学院 西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 云南 勐仑 666303; 2.中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘 要** 利用土壤溅蚀杯方法测定了西双版纳地区单层、两层和多层人工橡胶林林冠下的土壤溅蚀率以及林外空旷地的土壤溅蚀率。实验结果表明, 单层、多层和两层人工橡胶林的土壤溅蚀率分别为林外空旷地的 1.55、1.30 和 1.05 倍, 表明 3 种不同橡胶林林冠的穿透水侵蚀力均大于林外空旷地的降水侵蚀力, 尤其是单层橡胶林。分析认为, 林下土壤溅蚀率和穿透水侵蚀力与林冠结构有着极其密切的关系, 尤其是冠层高度、覆盖度。高度较小、覆盖度较大的冠层对控制林地土壤溅蚀和穿透水侵蚀力方面具有明显的正面效应。因此在营造人工橡胶林的水土保持系统时, 应在林下种植覆盖高、植冠低的经济作物, 从而形成有效减弱穿透水侵蚀力的林冠结构, 同时应有效保护、管理林地的地表枯落物层, 以减少雨滴对地表的侵蚀。

**关 键 词** 土壤侵蚀; 土壤溅蚀; 穿透水侵蚀力; 林冠结构; 人工橡胶林

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 0564-3945(2012)06-1348-07

土壤侵蚀(Soil erosion)是当前主要的全球性环境与生态问题之一, 是现代土壤科学、水文科学和生态学研究的重要内容之一。土壤溅蚀(Soil splash erosion)是土壤侵蚀的重要形式和组成部分, 指由于降雨雨滴打击土壤表层的作用, 引起地表土壤颗粒分散和迁移的一种土壤侵蚀形式, 是土壤侵蚀过程发生的前期阶段和关键环节, 是影响坡面水蚀的一个重要威胁因素<sup>[1-8]</sup>。国内外土壤溅蚀领域已开展大量研究, 并取得了显著成果, 主要集中在土壤溅蚀的特征、过程与机制、影响因素及其关系模型等方面<sup>[5,9]</sup>。但对于森林土壤溅蚀效应机理方面研究仍然处于初步探索阶段, 进一步的深入研究非常必要。长期以来, 国内外倾向于某一森林类型为材料来探讨其林下土壤溅蚀的过程、机制及数量关系方面, 缺乏不同森林类型影响土壤溅蚀的对比研究<sup>[9]</sup>。

热带季节雨林是西双版纳地区主要分布的原始植被类型。自从上世纪 70 年代以来, 由于经济发展的需要, 该地区显著的土地利用/覆盖变化就是大面积的热带季节雨林向人工橡胶林的转变。橡胶林现已成为该地区的主要植被类型之一。该植被变化是影响热带季节雨林生态系统结构、功能及动态变化的最普遍主导因素之一, 并且今后长时期内将极有可能是导致严重生态与环境效应, 尤其是引起区域性土壤侵蚀、水土

流失及土地退化的一个重要威胁因子<sup>[10]</sup>。对此, 前人已经做了大量的研究工作<sup>[10-12]</sup>, 为西双版纳地区以区域性生物多样性保护为中心的生态与环境建设提供了坚实的决策依据。但就侵蚀领域而言, 关于人工橡胶林的研究极少涉及, 很大程度分散了许多学者的注意力。野外调查表明, 该地区部分橡胶林存在较严重地表土壤侵蚀现象, 主要是因为林下缺乏枯落物层的覆盖, 以及人为管理活动引起的表层土壤结构破坏等因素所致。近期, 有研究<sup>[12]</sup>提出西双版纳地区森林植被变化很有可能导致表层土壤受雨滴击溅作用。因此, 关于橡胶林表层土侵蚀方面的研究是十分必要的。根据野外的调查工作, 种植于西双版纳地区的人工橡胶林有多种不同的林冠结构, 分别为单层、两层和多层。不同橡胶林林冠下的土壤溅蚀率及穿透水侵蚀力(Throughfall erosivity)是否存在一致性或差异性, 现已成为热带森林生态水文功能领域中重要的科学问题之一。研究不同橡胶林林冠下的土壤溅蚀以及穿透雨侵蚀力是揭示热带森林表层土壤侵蚀过程与机制的基础。本研究在已有工作的基础上, 以西双版纳地区单层、两层和多层林冠的人工橡胶林为研究对象, 利用土壤溅蚀杯方法开展不同人工橡胶林林冠下的土壤溅蚀率对比分析实验研究, 以揭示林冠在控制土壤溅蚀和穿透水侵蚀力中的影响和作用, 为西双版纳地区橡胶林水土保持

收稿日期: 2011-09-21; 修订日期: 2011-12-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271051 和 31170447)资助

作者简介: 罗亲普(1986-), 男, 海南乐东人, 硕士, 主要从事森林生态水文研究。E-mail: lqp1999@yahoo.com.cn

\* 通讯作者: E-mail: lwj@xtbg.org.cn

复合系统的营造及生态与环境建设的布局规划和措施配置提供一定的参考。

## 1 研究区概况

研究区域为西双版纳州,位于云南省南部,约当 $21^{\circ}09' \sim 22^{\circ}36' \text{N}$ , $99^{\circ}58' \sim 101^{\circ}50' \text{E}$ 之间,总面积 $19690 \text{ km}^2$ 。西双版纳南与老挝、缅甸接壤,西、北、东三面与滇西南山原、山地相连,属于横断山系南端无量山脉和怒山山脉的余脉。整个地势周围高,中部低,以山原为主,其中又分布着许多宽谷盆地、低山和低丘。海拔范围从最低处澜沧江河谷 $550 \text{ m}$ 至最高峰 $2429.5 \text{ m}$ 。西双版纳的典型热带地区仅为海拔 $900 \sim 1000 \text{ m}$ 以下的低山、河谷及坝区,约占总面积 $18\%$ 。该研究区终年受西南季风控制,属典型热带季风气候。年平均气温 $21.5^{\circ}\text{C}$ , $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 $7860^{\circ}\text{C}$ ,平均最低气温 $7.5^{\circ}\text{C}$ ,年日照时数 $1828 \text{ h}$ ,年降水量 $1557 \text{ mm}$ ,年相对湿度 $86\%$ ,干燥度 $1.01$ ,年径流量 $764 \text{ mm}$ 。一年中有三个明显的季节划分:雾凉季(11月~次年2月)、干热季(3~4月)和雨季(5~10月)。干热季时气候高温干燥,湿热季时潮热多雨;降雨量占全年降雨量的 $84\%$ 左右;雾凉季温度相对较低,早晚多雾。土壤为由白垩纪砂岩发育而成的砖红壤<sup>[11-14]</sup>。

选取的单层、两层、多层人工橡胶林样地位于中国科学院西双版纳热带森林生态系统研究站(CERN)的橡胶—茶叶—咖啡人工群落试验区内( $21^{\circ}56' \text{N}$ , $101^{\circ}15' \text{E}$ ,海拔 $580 \text{ m}$ ),1979年定植于坡度小于 $5^{\circ}$ 的西南坡上。橡胶树平均高度为 $24.6 \text{ m}$ ,其林冠基本郁闭。各橡胶林样地的橡胶树种植行距规范,均为 $4 \text{ m}$ ,株距为 $3.1 \text{ m}$ ,种植密度基本一致,林相整齐。

依据Foot等<sup>[15]</sup>的研究结论,林下土壤溅蚀分离率极有可能只响应于植物冠层高度和覆盖度。因此,十分有必要对3种类型橡胶林的林冠结构做一分析。本研究在选取的土壤溅蚀观测样点中,利用目测法估算林冠高度和覆盖度。其中,单层人工橡胶林群落(林冠)高度 $25 \text{ m}$ 左右,覆盖度约 $75\%$ ,林冠为单层结构,没有任何林下植被,只有一个层次,其高度为 $20 \sim 30 \text{ m}$ ,覆盖度约 $75\%$ 。两层人工橡胶林群落(林冠)高度 $25 \text{ m}$ 左右,覆盖度约 $95\%$ ,林下种植大叶咖啡,林冠分为两层,林冠I层的高度为 $20 \sim 30 \text{ m}$ ,覆盖度约 $70\%$ ,林冠II层的高度为 $0.5 \sim 3 \text{ m}$ ,覆盖度约 $80\%$ 。多层人工橡胶林群落(林冠)高度 $25 \text{ m}$ 左右,覆盖度约 $90\%$ ,林冠为复层结构,该群落是人工模拟热带雨林而营造的多层人工林群落,优势种为橡胶(*Hevea brasiliensis*)、萝芙木(*Rauvolfia verticillata*)、木奶果(*Baccaurea ramiflora*);

其林冠可分为3层,林冠I层的高度为 $20 \sim 30 \text{ m}$ ,覆盖度约 $70\%$ ,林冠II层的高度为 $3 \sim 20 \text{ m}$ ,覆盖度约 $35\%$ ,林冠III层的高度为 $1 \sim 3 \text{ m}$ ,覆盖度约 $25\%$ 。

## 2 研究方法

### 2.1 土壤溅蚀观测点

分别在单层人工橡胶林、两层人工橡胶林和多层人工橡胶林样地选取1个土壤溅蚀观测点( $20 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ ),这3个观测点分别用大写字母标记为SRP、TRP和MRP。各观测点之间的距离均小于 $200 \text{ m}$ 。SRP、TRP和MRP的地表坡度分别为 $3^{\circ}$ 、 $2^{\circ}$ 和 $4^{\circ}$ 。此外,本研究在林外空旷地选取1个土壤溅蚀观测点,坡度为 $2^{\circ}$ ,将其标记为Open,目的是为了和林内土壤溅蚀率进行比较。该林外观测点离单层橡胶林样地的距离约 $150 \text{ m}$ ,其气象环境因素与各橡胶林观测点基本相似。

### 2.2 数据采集

**2.2.1 降雨量** 利用自记雨量器(JL-21)在林外观测点连续测定大气降雨量,雨量器测定精度为 $0.2 \text{ mm}$ ,设置时间间隔为 $30 \text{ min}$ 。降雨量的观测时间为2011年5月4日-7月3日。

**2.2.2 土壤溅蚀率** Ellison型溅蚀杯是测定土壤溅蚀率和降雨侵蚀力的重要方法,该方法在国内外已得到广泛运用<sup>[12, 5]</sup>。本研究采用的Ellison型溅蚀杯为一直径 $80 \text{ mm}$ 、高 $50 \text{ mm}$ 的铝盒。铝盒杯底有6个直径为 $3 \text{ mm}$ 的小孔,并垫上滤纸,目的是用于土壤水的自由渗漏,可防止溅蚀杯内积水。

所采用的试验用土为砖红壤的扰动土。试验土壤取自单层人工橡胶林试验样地受人为干扰极少的斜坡上表层土壤( $0 \sim 5 \text{ cm}$ ),该土壤为西双版纳地区的地带性砖红壤,质地为粘壤土。表层土壤自野外取回后,将其于 $105^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干,研磨,过直径 $2 \text{ mm}$ 的土壤分析筛后备用。

土壤溅蚀率的测定程序:自自然降雨前,将土壤样品分别均匀连续装进到Ellison型溅蚀杯中,样品经过充分混合且与杯口相平行。在电子天平上称其重量,然后置于贮水的盘中,使其达到或接近饱和水分状态。将装有扰动土的15个土壤溅蚀杯分别随机安装在单层人工橡胶林、两层人工橡胶林和多层人工橡胶林观测点内,3个随机安装于林外空旷地观测点内。各样点土壤溅蚀杯安装坡度均与该样点坡度相同。降雨后将溅蚀杯带回实验室,将其置于 $105^{\circ}\text{C}$ 的烘干箱中烘干至恒重,称取其总重量。降雨前后的溅蚀杯重量变化差除以溅蚀杯口面积计算土壤溅蚀率(Splash erosion rates, SER),单位为 $\text{g m}^{-2}$ ,其中溅蚀杯口的面积为 $0.005024 \text{ m}^2$ 。据

近期研究<sup>[9]</sup>,土壤溅蚀率是表征降水侵蚀力大小的重要指标。降雨前后期间大约覆盖多次降雨事件,该期间作为 1 次土壤溅蚀率观测时段。本研究重复 4 次测定各观测点的土壤溅蚀率。

此外,为了分析叶片面积对汇集雨水的影响,研究利用叶面积仪(LI- 3000 A, Li- Cor Inc. NE, USA)测定了研究区橡胶树的叶片表面积大小。

3 研究结果

表 1 显示出 3 个橡胶林观测点及林外观测点在各观测时期的土壤溅蚀率。从该表中可看出,对于整个观测时期,林外空旷地观测点(Open)的平均土壤溅蚀率为 1406.58(g m<sup>-2</sup>),最大平均溅蚀率出现在第 2 个时期;单层橡胶林观测点 (SRP) 的平均土壤溅蚀率为

2176.55(g m<sup>-2</sup>),最大平均溅蚀率出现在第 4 个时期;两层橡胶林观测点 (TRP) 的平均土壤溅蚀率为 1473.93(g m<sup>-2</sup>),最大平均溅蚀率出现在第 2 个时期;多层橡胶林观测点 (MRP) 的平均土壤溅蚀率为 1822.92(g m<sup>-2</sup>),最大平均溅蚀率出现在第 4 个时期。各橡胶林观测点(SRP,TRP 和 MRP)的平均土壤溅蚀率均高于林外观测点,尤其是 SRP,SRP,TRP 和 MRP 观测点的平均土壤溅蚀率与林外观测点的比值分别为 1.55,1.05 和 1.30。测定结果还表明,在整个观测期间,MRP 的平均土壤溅蚀率高于 TRP,两者的比值为 1.24;而 SRP 的平均土壤溅蚀率均高于前两者,其与 MRP 和 TRP 的比值分别为 1.19 和 1.48。此外,各橡胶林观测点的土壤溅蚀率标准差均明显大于林外观测点的。

表 1 人工橡胶林和林外观测点在各观测时期的土壤溅蚀率  
Table 1 Splash erosion rates (SER) at three forest sites and open site in each observation period.

观测时段 Time	项目 Item	Open	SRP	TRP	MRP	SRP/Open	TRP/Open	MRP/Open
Period (May 5 - May 20)	SER [g m <sup>-2</sup> ]	948.78	1445.06	1263.27	1434.45	1.52	1.33	1.51
	SD	91.93	516.52	566.13	573.37			
	n	3	15	15	15			
	Precipitation [mm]	39.50						
Period (May 23 - Jun. 4)	SER [g m <sup>-2</sup> ]	2262.47	2599.52	1916.14	1925.42	1.15	0.85	0.85
	SD	196.37	579.37	935.04	516.83			
	n	3	15	15	15			
	Precipitation [mm]	84.00						
Period (Jun. 10- Jun. 18)	SER [g m <sup>-2</sup> ]	1380.04	1608.28	1394.64	1451.70	1.17	1.01	1.05
	SD	57.46	190.50	463.30	262.28			
	n	3	15	15	15			
	Precipitation [mm]	27.50						
Period (Jun. 23 - Jul.3)	SER [g m <sup>-2</sup> ]	1035.03	3053.34	1321.66	2480.10	2.95	1.28	2.40
	SD	59.71	530.31	409.22	515.81			
	n	3	15	15	15			
	Precipitation [mm]	218.50						
Overall	SER [g m <sup>-2</sup> ]	1406.58	2176.55	1473.93	1822.92	1.55	1.05	1.30
	SD	551.89	823.03	665.34	637.75			
	n	12	60	60	60			
	Precipitation [mm]	369.5						

注 SER:土壤溅蚀率;SD:土壤溅蚀率标准差;n:样本数;Precipitation:林外降雨量;Open:林外观测点;SRP:单层橡胶林观测点;TRP:两层橡胶林观测点;MRP:多层橡胶林观测点。

TRP 和 MRP 的土壤溅蚀率在第 2 个观测时期低于林外,在其他三个时期则均高于林外。而 SRP 的土壤溅蚀率在每个观测时期均高于林外。另外,3 个林内观测点(SRP,TRP 和 MRP)的土壤溅蚀率与林外观测点的土壤溅蚀率比值在不同观测时期是不相同的,比

值均出现微小的变化,其范围分别在 1.15 ~ 2.95, 0.85 ~ 1.33 和 0.85 ~ 2.40。此外,对于 4 个观测时期,MRP 的土壤溅蚀率均大于 TRP,而 SRP 的土壤溅蚀率均大于前两者。另一方面,对于每个观测时期,各橡胶林观测点的土壤溅蚀率标准差均明显大于林外观测点。



## 4 讨论

### 4.1 人工橡胶林和林外空旷地的土壤溅蚀率对比

最早表明林内穿透降雨侵蚀力大于林外降雨的研究来源于 Chapman<sup>[16]</sup>,该研究者发现红松林能够改变降雨雨滴的大小分布,并因此导致了穿透降雨动能的增加,但该工作并未进行林冠下实际土壤溅蚀量的测定。随后,一系列的研究证实该学者的结论。Mosley<sup>[17]</sup>在新西兰山毛榉林的试验结果表明:(1)林内降雨动能为林外降雨动能的 1.5 倍;(2)由溅蚀杯测定出的林冠下平均土壤溅蚀量为林外空旷地的 3.1 倍。Vis<sup>[18]</sup>的研究也趋向于此结论,该学者研究了 4 种相对不受干扰的热带森林对降水侵蚀力的影响,结果表明:(1)林冠下的土壤溅蚀量比林外空旷地多 15%~44%;(2)林冠穿透降水的动能比林外大气降水多 20%~70%。周跃等<sup>[19]</sup>发现云南松林通过形成大尺寸水滴产生叶滴溅蚀而对控制侵蚀方面带来了一定的负面影响。Nanko 等<sup>[20]</sup>发现日本扁柏林的林冠穿透水动能为林外大气降水动能的 2.7 倍。Calder<sup>[21]</sup>也提出了森林林冠不一定保护土壤表层避免受到雨滴击溅作用的观点。最近,Geißler 等<sup>[9]</sup>采用土壤溅蚀杯方法比较亚热带森林生态系统林冠的穿透降雨侵蚀力和林外大气降雨侵蚀力之间的差异,结果表明林冠穿透降雨侵蚀力是林外降雨侵蚀力的 2.59 倍。以上所列举的研究均支持了本试验在不同林冠结构橡胶林所显示出的结果,即各橡胶林观测点(SRP、TRP 和 MRP)的土壤溅蚀率均大于林外观测点,尤其是 SRP。该结果表明 3 种类型橡胶林林冠的穿透降水侵蚀力均大于林外空旷地大气降水的侵蚀力。

一系列研究<sup>[22-25]</sup>表明,降雨动能是描述土壤溅蚀的最为理想的降雨参数。降雨雨滴的直径和运动速度决定其动能<sup>[26,27]</sup>。一般而言,较高的降雨动能会导致较大的土壤溅蚀率<sup>[28]</sup>。在林区,植物冠层结构特征对于林地土壤溅蚀和穿透水侵蚀力起到了极其关键的作用。有研究者<sup>[29]</sup>证实使雨滴运动达到其终点速度的林冠高度为 12.8 m。在本研究中,单层人工橡胶林的林冠高度为 25 m,说明穿透水雨滴落到林地地表时的速度可以达到终点速度。另一方面,据已有的研究<sup>[17]</sup>,植物冠层可分离降雨雨滴成直径较小的雨滴,也可汇集雨滴成较大直径的雨滴,如冠滴水。植物冠层改变降雨雨滴直径大小的过程及其机制极其复杂<sup>[30]</sup>,但一般倾向于认为其能在叶面上聚集产生较大直径的雨滴<sup>[18,31,32]</sup>。Nanko 等<sup>[33]</sup>的研究表明阔叶树种,如 *Quercus acutissima* 的叶片能储存更多雨水,进而通过叶片表面汇集雨水形成尺寸大的冠滴水。近期,Geißler 等<sup>[9]</sup>的研究显示

叶片表面积为 38.09 cm<sup>2</sup> 的树种 *Schima superba* 具有聚集雨水、形成直径较大的穿透水雨滴的作用,该树种冠层的穿透水侵蚀力明显大于林外降水侵蚀力,并同时提出较大表面积的叶片能产生较大直径的穿透水雨滴,特别是冠滴水。以上所列举的研究均充分强调了叶面积对于穿透水雨滴直径方面具有十分重要的作用。橡胶是一个典型的热带树种,叶片表面面积一般较大。据本研究的叶面积测定结果,研究区橡胶树的叶片表面积为 67.73 cm<sup>2</sup>( $n = 9$ ),所以其能使雨水有机会在叶面上汇集产生较大直径的穿透水雨滴,这对穿透水动能的增加有着重大贡献。此外,如上所述,单层橡胶林林冠的穿透水雨滴落地时的速度能够达到终点速度。基于以上分析可以认为,相比于林外大气降水,单层橡胶林林冠的穿透水具有明显较高的动能,在很大程度上增加了分离土壤颗粒的能力,因而导致较大的土壤溅蚀率。另一方面,结果表明多层橡胶林观测点的土壤溅蚀率为林外观测点的 1.30 倍,这说明多层橡胶林林冠穿透降雨的侵蚀力大于林外降雨的侵蚀力,但相比于单层橡胶林,其较有利于保护地表避免雨滴击溅作用。根据野外的调查工作,多层橡胶林的叶片形状、大小与单层橡胶林基本相似,这表明其同样能聚集雨水,使林冠穿透水雨滴的直径增大。但该群落林冠的最低层的覆盖度(25%)并不高,对来自于较高冠层的穿透水(尤其是冠滴水)冲击的承受能力有限,部分穿透水雨滴能达到终点速度落到地表,进而增加穿透水的动能,一定程度上不能很好地控制穿透水侵蚀的效应。因此,多层橡胶林观测点的土壤溅蚀率也同样大于林外观测点。此外,测定结果显示两层橡胶林观测点的土壤溅蚀率为林外观测点的 1.05 倍,反映了两层橡胶林林冠的穿透水侵蚀力几乎等于林外大气降水侵蚀力。这主要是由于两层橡胶林林冠最低层的覆盖度较大,高达 80%,可以十分有效地使大部分穿透水雨滴不能以其终点速度到达林地地表,进而很大程度上降低穿透水的动能,减少了土壤溅蚀率。

此外,据表 1 的结果,可以得出在不同的观测时期,各橡胶林观测点(SRP、TRP 和 MRP)的土壤溅蚀率与林外观测点的比值并不相同,存在一定的波动幅度。其主要原因是风速和降雨强度不同观测时期中很可能存在一定的差异,而据 Nanko 等<sup>[20,33]</sup>的研究结论,即风速和降雨强度影响了穿透降水的属性,因为这 2 个因素影响了冠层存储能力。

需指出的是,本研究关于人工橡胶林林冠下的土壤溅蚀率和穿透水侵蚀力的结论是在没有林地枯落物层的条件下得出的。也就是说,研究选取的人工橡胶林

实际发生的表层土壤溅蚀率还要取决于枯落物层的覆盖厚度和面积情况。据本研究的结果,可以进一步假设,在枯落物层被干扰、破坏导致林下表层土壤暴露的条件下,人工橡胶林林冠穿透雨较高的动能极有可能导致较大的实际土壤溅蚀率。因此,保护、管理橡胶林的枯落物层是绝对必要的。国内有研究工作<sup>[34]</sup>初步探讨了山地橡胶林凋落物的生态水文效应,但关于橡胶林枯落物层影响林下土壤溅蚀方面仍未出现报道,进一步的研究十分必要。

另一方面,测定结果显示人工橡胶林观测点(SRP、TRP和MRP)土壤溅蚀率的标准差均明显大于林外空旷地土壤溅蚀率的标准差。该结果表明橡胶林林冠穿透雨侵蚀力的非均匀性较大,而林外大气降雨侵蚀力的非均匀性则较小,这与已有的结论<sup>[9]</sup>相一致。其可能原因在于与林外降雨相比,冠滴渗透水(间接渗透水)对林冠穿透雨侵蚀力的空间不均匀性有极其重要的贡献<sup>[9,20,35-38]</sup>。

#### 4.2 不同林冠结构橡胶林的土壤溅蚀率对比

研究结果表明3个橡胶林观测点的土壤溅蚀率并不相同,其大小顺序为:SRP > MRP > TRP。这一结果表明单层橡胶林林冠的渗透水侵蚀力最大,多层橡胶林林冠次之,而两层橡胶林林冠最小。此结果基本符合已有的研究结论,即较高的植冠,其渗透水的侵蚀力可以大于林外降水的侵蚀力<sup>[18,29]</sup>,而对于某一特定高度的冠层,其覆盖度的明显增加可导致土壤溅蚀分离的显著减少<sup>[39]</sup>。最近,Geißler等<sup>[9]</sup>发现亚热带森林生态系统不同演替阶段(幼龄林、中龄林、成熟林)的穿透降雨侵蚀力之间存在明显的差异,幼龄林的穿透水侵蚀力最大,中龄林的次之,而成熟林的最小,分析认为,这一差异主要是幼龄林、中龄林和成熟林之间不同的覆盖度和高度所致,高度较小、覆盖度较大的冠层能导致较低的土壤溅蚀率和渗透水侵蚀力。该研究者认为林地土壤溅蚀和渗透水侵蚀力与林冠结构有着极其密切的关系,尤其是林冠高度和覆盖度。Foot等<sup>[15]</sup>的室内试验研究了叶片倾角(Leaf inclination)、叶片取向(Leaf orientation)、有效冠层面积(Effective canopy area)、叶面积指数(Leaf area index)、冠层重叠面积(Canopy overlap area)等等植物形态参数对林下土壤溅蚀的影响,结果表明土壤溅蚀只响应于明显的高度和有效冠层面积,并同时指出利用高度和覆盖度就可足够模拟植物冠层对雨滴溅蚀的影响。据该研究者的描述<sup>[15]</sup>,有效冠层面积类似于覆盖度的概念。很显然,以上所列举的研究均强调了森林土壤溅蚀、林冠渗透水侵蚀力主要取决于林冠高度和覆盖度。另一方面,近年国内学者<sup>[40]</sup>提出了

基于植物群落结构的结构化植被因子理念。这一理念考虑了群落结构中各层次的相对作用,并结合各层次的盖度来综合反映植被对土壤侵蚀的影响,是一种理想的植被因子指标;其进一步的案例分析表明要获得理想的结构化植被因子指数,使得植被群落具有良好的水土保持效益,需注重群落垂直层次间的合理配置。因此,在本研究中分析不同橡胶林林冠对林下土壤溅蚀率或渗透水侵蚀力影响时,必需考虑林冠结构特征,尤其要着重关注林冠各分层覆盖度、高度及其在不同橡胶林中的差异。如上所述,单层橡胶林的垂直结构简单,只有一个层次,在3种类型橡胶林中,其林冠覆盖度最小。两层和多层橡胶林的垂直结构较为复杂多样,有一定的成层性,在林冠高度和覆盖度上具有很大程度的相似性;然而二者的林冠最低层的高度和覆盖度仍存在一定差异,相比于后者,前者的高度较小,覆盖度较大。此外,3种类型橡胶林林冠的高度基本相同。需提及的是,林冠是有一定范围的<sup>[41]</sup>,根据野外的调查工作,两层和多层橡胶林的林冠最低层明显较矮,二者的第一活枝层高度分别为0.5 m和1 m。另外,研究区中的橡胶树冠的枝叶密度在冠层中部较大,单层橡胶林的第一活枝层高为20 m,且没有任何林下植被。综合以上讨论可以推测出,与两层和多层橡胶林相比,单层橡胶林林冠具有较高的渗透水动能,并因此导致较大的土壤溅蚀率。其最主要原因归结于绝大部分渗透水的雨滴在到达该林地地表时能够达到其终点速度,因而有助于增加渗透水动能<sup>[9,27]</sup>。除此之外,该林冠较低的覆盖度也是造成土壤溅蚀率减少的可能原因<sup>[9,39]</sup>。本研究在土壤溅蚀控制的角度上验证和发展结构化植被因子指数理念。

另一方面,两层、多层橡胶林在叶片结构、大小方面区别很小,大都属于阔叶,大小相差不多。这反映二者的冠层均具有汇聚雨水的潜力,能导致渗透水雨滴直径的增大。早期研究<sup>[18,32]</sup>认为渗透水雨滴大小分布很大程度上独立于林冠树种。而Hall等<sup>[42]</sup>的试验测定了三种热带人工林林冠的渗透水雨滴大小分布,结果则表明不同林冠的渗透水雨滴大小分布并不一致。因此,本研究中不能确定多层和两层橡胶林在渗透水水滴大小分布上有何差别,有待今后的研究加以证实。在此必需提及的是,二者在林冠结构特征方面却存在一定程度的不同,尤其是最低层的高度和覆盖度。如前所述,多层橡胶林林冠较为复杂,可分为3层,林冠最低层的高度为1~3 m,覆盖度较低,为25%。两层橡胶林林冠结构相对较简单,但林冠的最低层较矮,为0.5~3 m,且覆盖度十分大,达到80%。这进一步说明,相比于多



层橡胶林,两层橡胶林的最低层林冠较能有效地拦截大部分穿透水的雨滴,使其不能达到终点速度,并因此导致了到达林地地表的穿透水动能和侵蚀力的减弱。在以上讨论的基础上,可以认为多层橡胶林林冠的穿透水动能高于两层橡胶林林冠的,因此前者的土壤溅蚀率高于后者。该结果表明林冠的垂直层次结构在控制穿透水侵蚀力方面同样具有不可低估的作用,同时也强调了森林生态系统中林下植被控制穿透水侵蚀力的重要性,林下植被受人为干扰或破坏将增强雨滴对地表的击溅侵蚀效应。

已有研究<sup>[9,31,41]</sup>指出在选择适合的水土保持林方面应充分考虑林冠结构的重要性,尤其是林冠覆盖度和高度,这与本研究在不同林冠结构橡胶林所显示出的结果基本一致。总体上来说,覆盖度较大、高度较小的植物冠层在保护地表避免雨滴溅蚀方面具有正面的效应。因此,在营造人工橡胶林水土保持系统方面应在林下种植冠层覆盖度较高、高度较低的经济作物,进而形成能够有效减弱穿透水侵蚀力的林冠结构。

#### 参考文献:

- [1] VAN DIJK A I J M, MEESTERS A G C A, BRUIJNZEEL L A. Exponential distribution theory and the interpretation of splash detachment and transport experiments [J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66: 1466 - 1474.
- [2] ELLISON W D. Studies of raindrop erosion [J]. Agricultural Engineering, 1944, 25: 131- 136, 181 - 182.
- [3] MORGAN R P C. Field Studies of Rainsplash Erosion [J]. Earth Surface Processes, 1978, 3: 295 - 298.
- [4] KINNELL P I A. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: a review[J]. Hydrological Processes, 2005, 19(14): 2815 - 2844.
- [5] 罗亲普, 刘文杰. 土壤溅蚀过程和研究方法综述 [J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 230 - 235.
- [6] LEGUÉDOIS S, PLANCHON O, LEGOUT C, et al. Splash projection distance for aggregated soils: Theory and experiment [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69: 30 - 37.
- [7] 吴普特, 周佩华. 地表坡度对雨滴溅蚀的影响 [J]. 水土保持通报, 1991, 11(8): 34 - 38.
- [8] 郑粉莉, 高学田. 坡面土壤侵蚀过程研究进展[J]. 地理科学, 2003, 23(2): 230 - 235.
- [9] GEIßLER C, KÜHN P, BÖHNKE M, et al. Splash erosion potential under tree canopies in subtropical SE China [J]. Catena, 2010, doi: 10.1016/j.catena.2010.10.009
- [10] LI H M, AIDE M, MA Y X, et al. Demand for rubber is causing the loss of high diversity rain forest in SW China [J]. Biodiversity and Conservation, 2007, 16: 1731- 1745.
- [11] LIU W J, ZHANG Y P, LI H M, et al. Fog drip and its relation to groundwater in the tropical seasonal rainforest of Xishuangbanna, SW China: a preliminary study[J]. Water Research, 2005, 39: 787 - 794.
- [12] LIU W J, LIU W Y, LU H J, et al. Runoff generation in small catchments under a native rain forest and a rubber plantation in Xishuangbanna, southwestern China [J]. Water and Environment Journal, 2011, 25: 138 - 147.
- [13] CAO M, ZOU X M, WARREN M, et al. Tropical forests of Xishuangbanna, China[J]. Biotropica, 2006, 38: 306 - 309.
- [14] 刘 隆, 胡桐元, 杨毓才, 等. 西双版纳国土经济考察报告 [M]. 昆明: 云南人民出版社, 1990.
- [15] FOOT K, MORGAN R P C. The role of leaf inclination, leaf orientation and plant canopy architecture in soil particle detachment by raindrops [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2005, 30: 1509 - 1520.
- [16] CHAPMAN G. Size of raindrops and their striking force at the soil surface in a Red Pine plantation [J]. Transactions of American Geophysical Union, 1948, 29: 664 - 670.
- [17] MOSLEY M P. The effect of a New Zealand beech forest canopy on the kinetic energy of water drops and on surface erosion [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1982, 7(2): 103 - 107.
- [18] VIS M. Interception, drop size distributions and rainfall kinetic energy in four Colombian forest ecosystems [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1986, 11: 591 - 603.
- [19] 周 跃, 李宏伟, 徐 强. 云南松林的林冠对土壤侵蚀的影响[J]. 山地学报, 1999, 17(4): 324 - 328.
- [20] NANKOK, HOTTAN, SUZUKI M. Assessing raindrop impact energy at the forest floor in a mature Japanese cypress plantation using continuous raindrop- sizing instruments [J]. Journal of Forest Research, 2004, 9: 157 - 164.
- [21] CALDER I R. Canopy processes: implications for transpiration, interception and splash induced erosion, ultimately for forest management and water resources[J]. Plant Ecology, 2001, 153: 203 - 214.
- [22] AL- DURRAH M M, BRADFORD J M. Parameters for describing soil detachment due to single waterdrop impact[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46: 836 - 840.
- [23] POESEN J. An improved splash transport model [J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 1985, 29: 193 - 211.
- [24] MORGAN R P C, QUINTON J N, SMITH R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1998, 23(6): 527 - 544.
- [25] QUANSAH C. The effect of soil type, slope, rain intensity and their interactions on splash detachment and transport [J]. Journal of Soil Science, 1981, 32: 215 - 224.
- [26] BROOKS S M, SPENCER T. Vegetation modification of rainfall characteristics: implications for rainfall erosivity following logging in Sabah, Malaysia [J]. Journal of Tropical Forest Science, 1995, 7: 435 - 446.
- [27] DOHRENWEND R E. Raindrop erosion in the forest. 1977, Michigan Technological University, Ford Forestry Centre L'Anse Michigan 49946, Research Note 24.
- [28] FINNEY H J. The effect of crop covers on rainfall characteristics and splash detachment [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1984, 29: 337 - 343.
- [29] WANG P K, PRUPPACHER H R. Acceleration to terminal velocity

- of clouds and raindrops[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1977, 16: 275 - 280.
- [30] HERWITZ S. Interception storage capacities of tropical rain forest canopy trees[J]. *Journal of Hydrology*, 1985, 77: 237 - 252.
- [31] 游 珍, 李占斌, 蒋庆丰. 植被对降雨的再分配分析[J]. *中国水土保持科学*, 2003, 1(3): 102 - 105.
- [32] BRANDT C J. The size distribution of throughfall drops under vegetation canopies. *Catena*, 1989, 16: 507 - 524.
- [33] NANKO K, HOTTA N, SUZUKI M. Evaluating the influence of canopy species and meteorological factors on throughfall drop size distribution[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 329: 422 - 431.
- [34] 卢洪健, 刘文杰, 罗亲普. 西双版纳山地橡胶林凋落物的生态水文效应[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(10): 2129 - 2136.
- [35] BRANDT J. The transformation of rainfall energy by a tropical rain forest canopy in relation to soil erosion [J]. *Journal of Biogeography*, 1988, 15: 41 - 48.
- [36] WEI X, LIU S, ZHOU G, et al. Hydrological processes in major types of Chinese forest[J]. *Hydrological Processes*, 2005, 19: 63 - 75.
- [37] REID L M, LEWIS J. Rates, timing, and mechanisms of rainfall interception loss in a coastal redwood forest [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, doi:10.1016/j.jhydrol.2009.06.048.
- [38] ZIEGLER A D, GIAMBELLUCA T W, NULLET M A, et al. Throughfall in an evergreen-dominated forest stand in northern Thailand: comparison of mobile and stationary methods [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149: 373 - 384.
- [39] ELWELL H A, STOCKING M A. Vegetal cover to estimate soil erosion hazard in Rhodesia[J]. *Geoderma*, 1976, 15: 61 - 70.
- [40] 雷婉宁, 温仲明. 基于植物群落结构的水土流失植被因子指数研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22 (5): 63 - 72.
- [41] 周国逸. 几种常用造林树种冠层对降水动能分配及其生态效应分析[J]. *植物生态学报*, 1997, 21 (3) 250 - 259.
- [42] HALL L, CALDER I R. Drop size modification by forest canopies: Measurements using a disdrometer [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 90, 465 - 470.

## Comparison of the effect of different canopy of rubber plantation on soil splash erosion and throughfall erosivity

LUO Qin-pu<sup>1,2</sup>, LIU Wen-jie<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Tropical Forest Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Menglun 666303, Yunnan, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Landscape in Xishuangbanna, SW China changed dramatically during the past three decades when massive tropical rainforest lands were converted to rubber plantation lands, with potentially critical ecological and environmental consequence. To study the impacts of different canopy of rubber plantation on soil particle detachment by rainfall, splash erosion rate (SER) was investigated in a single layer canopy rubber plantation (SRP), a two layers canopy rubber plantation (TRP) and a multiple layers canopy rubber plantation (MRP) by conducting field experiments with Ellison-type splash cups. The results of the measurements under forest canopy showed that the SER in the SRP, MRP and TRP were separately 1.55, 1.30 and 1.05 times higher than that in the open conditions, indicating that the erosivity of throughfall under the three canopy structural types of rubber plantation was higher than that in the open. This meant that protecting the soil from raindrop impact was not valid for the TRP, MRP and particularly the SRP. Based on this result, we proposed that only the litter layer played an important role in controlling splash erosion, and removal of the litter layer in these rubber forests stands was likely to produce higher erosion rates than open field. Furthermore, results also indicated that the erosivity of throughfall was highest in the SRP, followed by the MRP, and the lowest in the TRP, suggesting that the throughfall erosivity was strictly linked to the forest canopy structure, especially height and canopy cover. The implication of the results is that an important consideration in managing the rubber plantation may be the plantation of tea or other economic crops with high coverage and low height under that canopy, forming a canopy structure which is effective in decreasing throughfall erosivity and rainsplash erosion on the forest floor.

**Key words:** Soil erosion; Soil splash erosion; Throughfall erosivity; Canopy structure; Rubber plantation